

우리나라 산림지부분 입목바이오매스 탄소저장량의 불확도 평가

임종수*[†] · 신중훈** · 강대익***

*국립산림과학원 산림ICT연구센터 임업연구사, **국립산림과학원 산림정책연구과 석사연구원, ***산림청 정보통계담당관실 과장

Uncertainty Assessment of Carbon Stock in Living Biomass in Korean Forests

Yim, Jong Su*[†] · Shin, Joong Hoon** and Kang, Dae Ik***

*Research Scientist, Forest ICT research center, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

**Postmaster Researcher, Forest Policy and Economics Division, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

***Director, ICT Management and Statistics Division, Korea Forest Service, Daejeon, Korea

ABSTRACT

The Paris Agreement recommends its member parties to enhance transparency in Greenhouse Gas (GHG) inventory by sector. IPCC guidelines provide recommendations for reducing uncertainties of GHG emissions and removals for the accurate assessment. Thus, this study aimed to assess the uncertainties of estimated carbon stocks for living biomass in the forestry sector. Living biomass is an essential indicator for monitoring GHG removals in the LULUCF sector. This study made a comparative assessment of the uncertainty by applying error propagation methods (simple multiplication, addition and subtraction) and the Monte Carlo Simulation (MCS) suggested in the IPCC guidelines. The findings showed that the overall uncertainty for the simple multiplication in the error propagation was found to be as high as $\pm 28.0\%$ due to higher uncertainties of country-specific emission factors. In contrast, the overall uncertainty was as low as $\pm 3.6\%$ for the addition and subtraction considering the sensitiveness of activity data and emission factors as explanatory variables, while that for the MCS was at around $\pm 6.0\%$. Despite the slightly higher uncertainty for MCS compared with addition and subtraction, it is reasonable to apply uncertainty assessment using MCS considering the international reliability and comparability. Additionally, since living biomass causes various error sources including measurement error and volume equations by tree species, there is a need for research to assessing different error sources for uncertainty.

Key words: Forest Land, Living Biomass, Removals, Carbon Stock, Uncertainty Analysis

1. 서론

유엔기후변화협약(UNFCCC)의 파리협정에 따라 모든 당사국들은 2024년부터 분야별 인위적 활동에 따른 온실가스 배출원 및 흡수원에 의한 온실가스 배출·흡수량을 국가 온실가스 인벤토리 문서(National Inventory Document; NID) 및 격년투명성보고서(Biennial Transparency Report; BTR)을 제출하고 강화된 투명성 프레임워크(Enhanced Transparency Framework; ETF)에 의해 국제적 검증을

받아야 한다(UNFCCC, 2022). 따라서 국가 온실가스 인벤토리 문서는 IPCC 지침에 따라 국가별 여건을 고려하지만, 일반적인 보고원칙(투명성, 완전성, 일관성, 정확성, 비교가능성)을 준수하여야 한다.

국가 온실가스 인벤토리는 IPCC 지침에 따라 분야별 온실가스 배출량 및 흡수량에 관한 불확실성(Uncertainty)을 평가하여 보고토록 하고 있으나(IPCC, 2006; 2019), 우리나라의 경우 에너지 분야를 제외한 다른 분야에서는 아직 불확도 평가를 보고하지 못하고 있다(GIR, 2021). 특히

[†]Corresponding author : yimjs@korea.kr (Hoegi-ro 57, Dongdaemun-gu, Seoul 02445, Korea. Tel. +82-2-961-2953)

ORCID 임종수 0000-0001-7316-6093
신중훈 0000-0001-5318-1632

강대익 0000-0002-7346-8435

토지이용, 토지이용변화 및 임업(LULUCF)분야의 탄소저장고는 자연에 의한 의존도가 높으며, 다양한 환경 요인에 영향을 크게 받으므로 타 분야대비 상대적으로 불확도가 높으므로(McGlynn et al., 2022), 온실가스 배출·흡수량의 산정과 함께 불확도 평가를 통한 통계의 신뢰성에 관한 정보를 제공할 필요가 있다.

산림은 유엔기후변화협약 하에서 온실가스 흡수원(Carbon sink)으로 인정하고 있으며, 파리협정에서도 흡수원으로 재인정되고 흡수원의 유지 및 증진을 위한 노력을 권고하고 있다(UNFCCC, 2016). 산림부문의 탄소저장고는 지상부·지하부 바이오매스, 고사유기물(고사목 및 낙엽층), 토양 및 수확된 목재제품으로 구분되며, 모든 탄소저장고에 관한 온실가스 배출·흡수량을 산정하고 불확도 평가를 수행하여야 한다. 불확도 평가는 인위적 활동에 의한 온실가스 배출·흡수량의 정확도 및 완전성을 나타내는 지표로 IPCC 지침은 온실가스 배출·흡수량에 관한 불확도를 평가하고 불확도가 높은 배출·흡수원의 정확도를 개선하기 위한 방안 도출에 활용하도록 하고 있다(IPCC, 2006). 온실가스 배출 및 흡수량은 활동자료와 배출·흡수계수에 의해 산출되므로 불확도 평가는 활동자료와 계수에 관한 불확도를 평가한 후 두 자료의 통합에 의해 산출되며, IPCC 지침은 불확도의 통합을 위하여 관련하여 오차증식법과 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 제시하고 있다(IPCC, 2006; Pyo et al., 2013; Holdaway et al., 2014).

캐나다의 경우, 산림부문에서 Carbon Budget Model (CBM)에 의한 탄소저장고에 관한 온실가스 배출·흡수량을 산정하고 있으며, 전체 탄소저장고의 불확도는 $\pm 15\%$ 로 추정된 바 있다(Metsaranta et al., 2017). Monni et al.(2007)은 핀란드 산림을 대상으로 IPCC의 방법론과 국가산림자원조사 자료를 이용하여 산림내 탄소저장량을 산정하고 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 불확도를 약 $\pm 19\%$ 로 평가하였다. 또한, Rätty and Kangas (2019)는 핀란드의 국가산림자원조사 고정표본점 정보 및 임시표본점을 활용한 불확도를 줄일 수 있는 방안을 제시하기도 하였다. 우리나라는 주요 산림수종의 국가고유계수에 관한 불확도 평가에 관한 연구를 수행한 바 있으며, 이러한 수종별 계수의 불확도는 국가고유계수 검증에 위한 기초자료로 활용되고 있다(Lehtonen et al., 2004; Seo et al., 2011; Pyo et al., 2013). McGlynn et al.(2022)은 LULUCF 분야를 대상으로 우리나라를 포함한 26개국의 불확도 평가현황을 분석한 결과 우리나라와 인도는 불확도에 관한

정보를 제공하지 않는 국가이며, 제출된 18개 국가들의 불확도는 12%(콜롬비아)~102%(캄보디아)로 나타났다.

우리나라는 산림 내 탄소저장고에 관한 탄소저장량을 산출하기 위하여 국가산림자원조사(National Forest Inventory; NFI)의 조사체계를 개편하여 표본설계 및 조사항목을 확대하였다. 즉, 표본의 대표성을 확보하고 효율적인 자료 수집을 위하여 중부원점을 기준으로 일정간격으로 표본을 배치하는 계통추출법(Systematic sampling)을 적용하였으며, 임목바이오매스뿐만 아니라 고사유기물(고사목 및 낙엽층) 및 토양탄소에 관한 자료를 수집할 수 있도록 조사체계 및 지침을 개정하여 기초자료를 수집하고 있다(KFRI, 2011). 우리나라는 국가산림자원조사에서 수집된 자료를 활용하여 국가단위의 임상별 임목축적을 추정하고 연간 임목축적의 성장량과 상대표준오차를 산출하며(Yim et al., 2012), 임상별 연간 임목축적 성장량을 활동자료로 활용하여 IPCC 지침에서 제시된 축적차이법(Stock-difference method)을 적용하여 임목바이오매스의 온실가스 배출·흡수량을 산정 및 보고하고 있다(GIR, 2021).

본 연구는 현재 우리나라 국가 온실가스 인벤토리에서 보고되고 있는 임목바이오매스의 탄소저장량을 대상으로 불확도 평가를 수행하기 위하여 IPCC 지침에서 제시된 불확도 통합방법에 따른 불확도를 평가 및 비교하여, 우리나라 임목바이오매스 탄소저장량의 불확도를 평가하기 위한 방법을 도출하기 위하여 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 임목바이오매스의 탄소저장량 산출방법

임목바이오매스는 LULUCF분야의 탄소저장고로 크게 지상부와 지하부로 구분된다. 지상부는 임목의 수간재적(임목축적)과 수관을 구성하는 가지 및 잎의 바이오매스를 의미하며 지하부는 뿌리의 바이오매스를 의미한다. 일반적으로 지상부 및 지하부 임목바이오매스의 탄소저장량은 식 (1)에 의해 산출되며, 연간 변화가 있는 임목축적은 활동자료가 되며, 수종(또는 임상)별 특성에 의해 규정되는 목재기본밀도, 바이오매스 확장계수, 뿌리함양비, 및 탄소전환계수는 배출·흡수계수로 적용된다(IPCC 2006).

우리나라의 경우, 임목축적은 국가산림자원조사 및 임상도에 의해 산출되고 있으며, 배출·흡수계수로 목재기본밀도, 바이오매스 확장계수 및 뿌리함양비는 국가

고유계수를 적용하고 있으므로 이에 관한 불확도 평가가 가능하다. 하지만, 탄소전환계수(바이오매스에 포함되는 탄소의 함량비)는 IPCC의 기본계수(침엽수종 0.51 및 활엽수종 0.48)를 적용하고 있으므로 불확도 평가에서 제외하였다. 따라서 본 연구에서는 임목바이오매스 탄소저장량의 불확도 평가를 위하여 임목축적 및 3개의 국가고유계수를 대상으로 불확도 평가를 수행되어야 하며, 각각의 불확도를 통합하여 전체 불확도를 평가하여야 한다.

$$C = \sum_{i,j} (A_{i,j} \times V_{i,j} \times BCEF_{s,i,j}) \times (1 + R_{i,j}) \times CF_{i,j} \quad \text{Eq. (1)}$$

- C : Carbon stock (Cton)
- A : Forest area (ha)
- $BCEF_s$: Biomass conversion expansion factors
(= Basic wood density × Biomass expansion factor)
- R : Root-shoot ratio,
- i : forest cover type or tree species
- V : Growing stock (m^3/ha)
- CF : Carbon factor ($tC/t.d.m.$)
- j : climate zone

2.2. 임상별 임목축적의 불확도 평가

우리나라는 산림자원의 현황을 파악하고 시간경과에 따른 변화를 모니터링하기 위한 국가산림자원조사(NFI)

를 1972년부터 주기적으로 수행하고 있으며, 2006년부터 시작된 제5차 NFI('06 ~ '10)부터는 중부원점을 기준으로 4km 간격으로 일정하게 표본을 배치하는 계통추출법을 적용하고 있다(Fig. 1). 또한, 매년 전체 표본점의 20%(약 800개 집락표본점)을 5년 동안 조사하는 연년조사체계를 적용하고 있다(KFRI, 2011).

산림자원량과 관련하여 임목축적은 최근 5년간 수집된 자료를 활용하여 연도별 임상별 임목축적을 사후층화추출법에 의해 산출하며, 연도별 임목축적의 통합은 가중이동평균법에 의해 산출된다. 이러한 평균 임목축적의 불확도는 상대추정오차에 의해 평가되며, 현행 국가산림자원 조사의 표본설계에 따라 Table 1의 산출식에 산출할 수 있다(Bechtold and Patterson, 2005; KFRI, 2011). 본 연구는 제7차 NFI('16 ~ '20)에서 수집된 고정표본점 자료를 기초자료로 활용하였다.

2.3. 수종별 국가고유계수의 불확도

임목바이오매스의 탄소저장량을 산출하기 위해서는 식(1)에서 제시된 목재기본밀도(Wood basic density; WD), 바이오매스 확장계수(Biomass expansion factor; BEF), 뿌리함량비(Root-to-shoot ratio; R), 그리고 탄소전환계수 등의 배출계수가 요구된다. 우리나라는 현재 19개 수종 및 3개 임상(침엽수림, 활엽수림, 상록활엽수림)에 관한 국가고유계수를 보유하고 있으며, 각 계수에 관한 불확도는 IPCC 지침에서 제시된 불확도 평가방법을 준용하여 산출

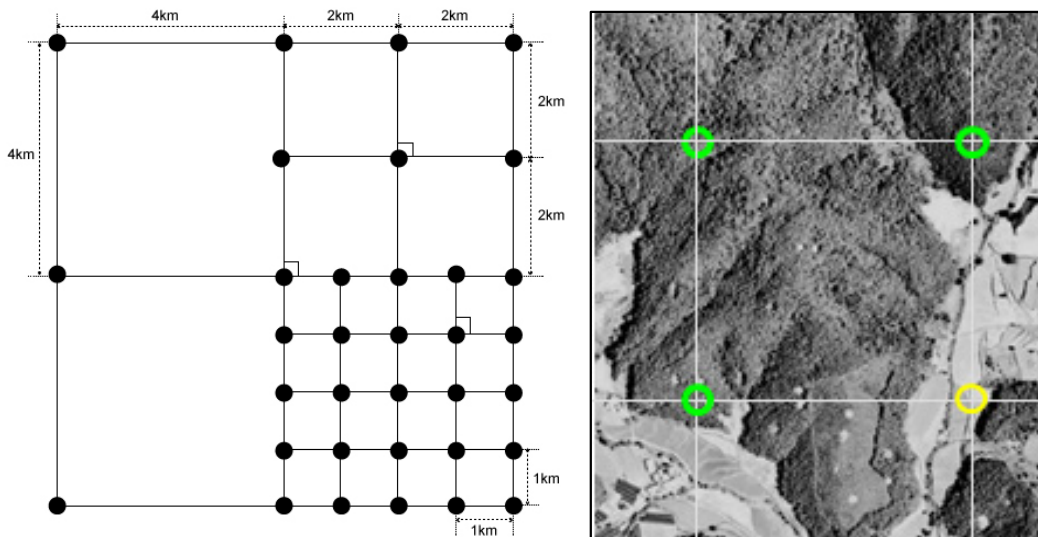


Fig. 1. Sampling and plot designs for the National Forest Inventory (KFRI, 2011)

Table 1. Estimators of estimated mean and variance of estimated mean by sampling methods

Sampling method	Estimated mean	Variance of estimated mean (Error variance)
Double sampling for post-stratification (DSS)	$\bar{y}_p = w'_{h,p} y_{h,p}$	$\hat{var}(\bar{y}) = \sum_{h=1}^3 w'_h \frac{s_h^2}{n_h} + w'_h \frac{(\bar{y}_h - \bar{y})^2}{n}$ $\bar{y}_h = \frac{\sum_{i=1}^{n_h} y_i}{n_h}, s_h^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_h} (y_i - \bar{y}_h)^2}{n_h - 1}$
Weighted moving average	$\bar{y}_{wma} = w'_l \times \bar{y}_l$	$\hat{var}(\bar{y}_{wma}) = \sum_{l=1}^5 w'^2_l \times \hat{var}(\bar{y}_l), w'_l = \frac{n'_l}{n}$

- y_i : stand volume at a subplot(i),
- \bar{y} : estimated mean,
- \bar{y}_h : estimated mean for h stratum,
- n : number of subplots,
- n_h : number of subplots for h stratum,
- w'_h : weight for h stratum,
- s_h^2 : sample variance for h stratum.
- \bar{y}_{wma} : estimated mean by weighted moving average,
- w'_l : weight at a surveyed year (l) and
- n'_l : number of subplots at a surveyed year (l)

하였다(GIR, 2021). 즉, 각 수종별 계수의 불확도는 계수의 평균과 표준편차에 의해 산출되며(IPCC, 2006), 임상별 배출계수는 수종별 면적에 따른 가중치를 부여하여 각각 산출하였다.

$$Uncertainty(\%) = \frac{2\sigma}{\mu} \times 100 \tag{Eq. (2)}$$

- μ : the mean of the distribution
- σ : standard deviation or standard error

2.4. 불확도의 통합방법

온실가스 배출원 및 흡수원의 온실가스 배출·흡수량의 불확도를 평가하기 위하여 IPCC 지침은 오차증식법(Error propagation)과 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation; MCS) 방법을 제시하고 있다. 오차증식법은 탄소저장량의 불확도를 산출하기 위해서는 활동자료와 배출계수의 불확도를 각각 산출한 후 통합하는 방법이며, MCS 방법은 활동자료와 배출계수의 확률밀도함수를 도출한 후 두 자료의 결합에 의한 추정치를 반복하여 탄소저장량을 추

정한다. 탄소저장량 추정치의 분포와 상한과 하한의 추정치에 의해 신뢰구간을 도출하는 방법이다(Monte et al., 1996).

2.4.1. 오차증식법(Tier 1)

오차증식법(Error propagation)은 탄소저장량의 불확도를 산출하기 위하여 활동자료와 배출계수의 불확도를 각각 산출한 후 통합하는 방법으로 단순증식법(Simple multiplication)과 증감법(Addition and subtraction)이 제시되고 있다(IPCC, 2006). 단순증식법은 활동자료 및 배출계수의 불확도를 단순히 더하는 방법이며, 증감법은 활동자료와 배출계수의 불확도에 각각의 가중치를 부여하는 방법이다. 따라서 본 연구에서는 단순증식법은 활동자료의 불확도(상대추정오차율)와 국가고유계수의 불확도를 합산하여 산출하였으며, 증감법은 임목축적을 100%으로 가정하여 목재기본밀도(함수율), 바이오매스 확장계수 및 뿌리함량비의 관계를 탄소저장량에 미치는 민감도로 가정하여 임목축적과 국가고유계수의 불확도에 가중치(기여도를 부여하는 방법을 적용하였다(Metsaranta et al., 2017).

$U_{total} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}$		(1) Simple multiplication
$U_{total} = \frac{\sqrt{(U_1 \cdot x_1)^2 + (U_2 \cdot x_2)^2 + \dots + (U_n \cdot x_n)^2}}{ x_1 + x_2 + \dots + x_n }$		(2) Addition and Subtraction
U_{total}	: The percentage uncertainty in the sum of the quantities. This term 'uncertainty' is thus based upon the 95% confidence interval.	
x_i and U_i	: The uncertain quantities and the percentage uncertainties associated with them, respectively	

2.4.2. 몬테카를로 시뮬레이션(Tier 2)

MCS 방법은 활동자료와 국가고유계수의 확률밀도함수를 도출한 후, 각각의 확률밀도함수를 활용하여 모집단을 충족할 수 있는 표본을 반복적으로 추출하여 모집단 추정치들의 분포에 의한 상한과 하한의 수치를 이용하여 모집단의 신뢰구간을 추정하는 방법이다. 본 연구에서는 제7차 NFI 데이터에서 4 km × 4 km 격자점에 속하는 침엽수림과 활엽수림으로 구분된 표본점의 단위면적당 입목축적 자료를 활용하여 각 임상별 면적 비율에 따른 표본개소수를 추출한 후, 표본들의 평균을 추정하였다. 이러한 표본추출을 10,000회 반복하여 임상별 입목축적 평균의 분포도를 도출하였다. 위에서 입목축적 표본점 자료가 따르는 확률분포를 추정하기 위하여 임상별 입목축적이 임의의 확률분포를 따른다고 가정하고, 가장 적합한 확률분포를 확인하기 위하여 Cullen and Frey (1999)의 방법을 사용하였다. 이 방법은 여러 확률분포가 가질 수 있는 왜도(Skewness)의 제곱과 첨도(Kurtosis)의 관계를 이용하여 임의의 데이터에 가장 적합한 확률분포를 선택하는 방법이다.

또한 임상별 국가고유계수는 선행 연구에서 정규분포 형태를 나타내고 있으므로(Seo et al., 2011; Pyo et al., 2013) 본 연구에서는 임상별 계수는 정규분포를 갖는 것으로 가정하였으며, 임상별로 적용된 계수들의 평균값과 표준편차는 Table 2와 같다(GIR, 2021). 결과적으로 탄소저장량 산출식에서 탄소전환계수를 제외한 모든 설명변수들을 앞서 설명한 바와 같이 적절한 확률변수로 가정하여 1만 번의 시뮬레이션을 수행하였다. 이 시뮬레이션 값들에서 2.5% 분위수와 97.5% 분위수를 구하고 이를 95% 신뢰수준의 신뢰구간으로 정의하였다.

MCS 분석은 통계분석 소프트웨어인 R (R Core Team, 2021)을 이용하였으며, 확률분포 탐색 및 분석에는 *fitdistrplus* 패키지(Delignette-Muller and Dutang, 2015)가, 그래프 출력에는 *ggplot2* 패키지(Wickham, 2016)를 사용하였다.

Table 2. Averages and standard deviations of emission factors by forest type

Forest type	Average			Standard deviation		
	WD	BEF	R	WD	BEF	R
Coniferous	0.46	0.43	0.27	0.014	0.019	0.037
Deciduous	0.68	0.51	0.36	0.010	0.021	0.044

* WD: Basic wood density, BEF: Biomass emission factor, R: Root-to-shoot ratio

3. 결과 및 고찰

3.1. 활동자료 및 국가고유계수의 불확도

제7차 NFI 자료를 활용하여 우리나라의 임상별 입목축적은 침엽수림, 활엽수림, 그리고 혼효림으로 구분되어 발표되고 있다. 그러나 온실가스 인벤토리 보고서의 경우, 혼효림은 침엽수림과 활엽수림에 각각 50%씩 배분되고 침엽수림과 활엽수림으로 구분하여 탄소저장량 및 온실가스 배출 및 흡수량이 산정된다. 따라서 본 연구에서는 임상별 ha당 입목축적의 상대추정오차(Relative sampling error; RSE)를 도출하여 불확도로 활용하였다. 전체 산림의 표준오차는 ±1.41 m³/ha로 분석되었으며 임상별 표준오차는 각각 ±1.53 m³/ha 및 ±0.91 m³/ha이며, 이에 따른 상대추정오차는 각각 ±1.39 및 ±1.21%로 분석되었다. 우리나라의 입목축적은 비록 집락형태의 표본점 구조를 나타내고 있으나, 표본단위는 부표본점(Sub-plot)을 적용하여 상대적으로 표본개소수가 많아 상대추정오차는 낮게 평가되고 있다(Yim et al., 2012).

입목바이오매스의 탄소저장량 산출을 위한 배출-흡수 계수의 경우 우리나라는 수종별 계수가 개발되어 적용되고 있으므로 국가고유계수의 불확도를 적용하였다(GIR,

Table 3. Uncertainties of forest growing stocks and emission factors by forest type

Forest type	Activity data		Emission factors					
	Growing stock (M m ³)	U (%)	WD		BEF		Root-to-shoot ratio	
			Average	U (%)	Average	U (%)	Average	U (%)
Coniferous	615	1.40	0.46	6.09	0.43	8.84	0.27	27.41
Deciduous	426	1.22	0.68	2.94	0.51	8.24	0.36	24.44

* WD: Basic wood density, BEF: Biomass emission factor, U: Uncertainty

2021). 임상별 계수와 불확도는 수종별 계수와 불확도를 활용하여 수종별 면적에 따른 가중치를 부여하여 산출하였다(Table 3).

3.2. 불확도의 통합방법 비교

3.2.1. 오차증식법

오차증식법은 Table 2 및 Table 3에서 제시된 활동자료와 국가고유계수의 불확도를 활용하여 단순증식법과 증감법에 의한 불확도를 산출하였다.

단순증식법은 각각의 불확도를 증식하는 것으로 임상별 탄소저장량의 불확도는 각각 29.5%와 26.0%로 평가되었으며, 임상별 임목축적의 비율을 가중치로 부여하여 전체 불확도는 28.0%로 평가되었다. Table 3에서 알 수 있듯이 활동자료(임목축적)의 불확도는 2%미만으로 낮은 반면 국가 고유계수의 불확도는 3~27%로 계수별 불확도는 차이가 있으며, 특히 뿌리함량비의 불확도는 24.4~27.4%로 상대적으로 높은 불확도를 나타내고 있어 이러한 영향으로 전체 불확도가 높게 평가된 것으로 판단된다.

증감법은 탄소저장량에 영향을 미치는 민감도에 따른 가중치를 부여하는 방법으로 임목바이오매스의 탄소저장량은 임목축적을 기준으로 수간부(목재기본밀도), 수관부(바이오매스 확장계수), 그리고 지하부(뿌리함량비)로 구분되며, Table 3에서 제시된 계수는 전체 임목바이오매스에 영향을 미치는 비율로 정의하였다(Table 4). 따라서 침엽수의 경우, 임목축적(100%)을 기준으로 목재기본밀도는 46%, 바이오매스 확장계수는 목재기본밀도 대비 43%이며, 지하부는 지상부(수간부+수관부)의 27%를 가중치로 적용하였다. 결과적으로 임목바이오매스 탄소저장량에 미치는 민감도는 임목축적이 0.42~0.54%로 높지만 뿌리함량비는 0.10~0.15%로 낮은 것으로 나타났다. 탄소저장량에 영향을 미치는 4개의 설명변수(x_i)의 표준화된 민감도(x_i)와 각각의 불확도를 증감법에 의해 산출한 결과, 침엽수림과 활엽수림의 불확도는 각각 $\pm 3.3\%$ 및 $\pm 4.1\%$ 이며, 임상별 임목

축적의 가중치를 부여한 전체 불확도는 $\pm 3.6\%$ 로 평가되었다.

Table 4. Sensitivities(x_i) by indicators for estimating carbon stock in living biomass

Forest type	x_i	Indicators for estimating carbon stock in living biomass			
		Growing stock	WD	BEF	R
Coniferous	x_i	1	0.46	0.20	0.18
	x_i	0.54	0.25	0.11	0.10
Deciduous	x_i	1	0.68	0.35	0.37
	x_i	0.42	0.28	0.14	0.15

임목바이오매스 탄소저장량의 불확도를 개선하기 위해서는 다른 계수보다 불확도가 높은 뿌리함량비의 정확도 향상이 요구되지만, 탄소저장량에 미치는 민감도가 0.10~0.15%로 낮으며 IPCC 지침에서 요구되는 30% 미만을 충족하고 있으므로 국가수준의 탄소저장량 평가에 있어서 현재의 계수 및 불확도를 적용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

3.2.2. 몬테카를로 시뮬레이션

Cullen과 Frey (1999)의 방법에 따라 표본점의 임상별 임목축적 데이터가 갖는 왜도 제곱값과 첨도의 위치를 표시한 결과(Fig. 2), 적합한 확률분포 대상군은 Log-normal, Gamma, 그리고 Weibull 분포인 것으로 나타났다.

각 확률분포의 적합도를 임상별로 살펴본 결과(Fig. 3 및 Fig. 4), 모든 임상에서 Weibull 분포가 가장 적합한 것으로 나타났다. Son et al.(1997)은 잣나무림과 신갈나무림을 대상으로 성장함수를 비교한 결과 Weibull 분포가 적용가능한 모형으로 제시한 바 있으며, 우리나라의 수종별 성장모형에서 Weibull 분포를 활용한 연구가 수

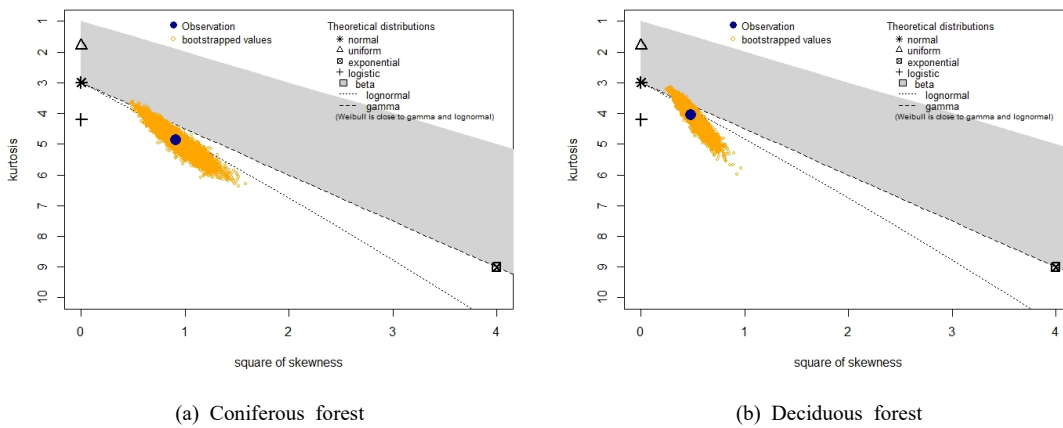


Fig. 2. Cullen and Frey graphs of growing stock for coniferous and deciduous forests

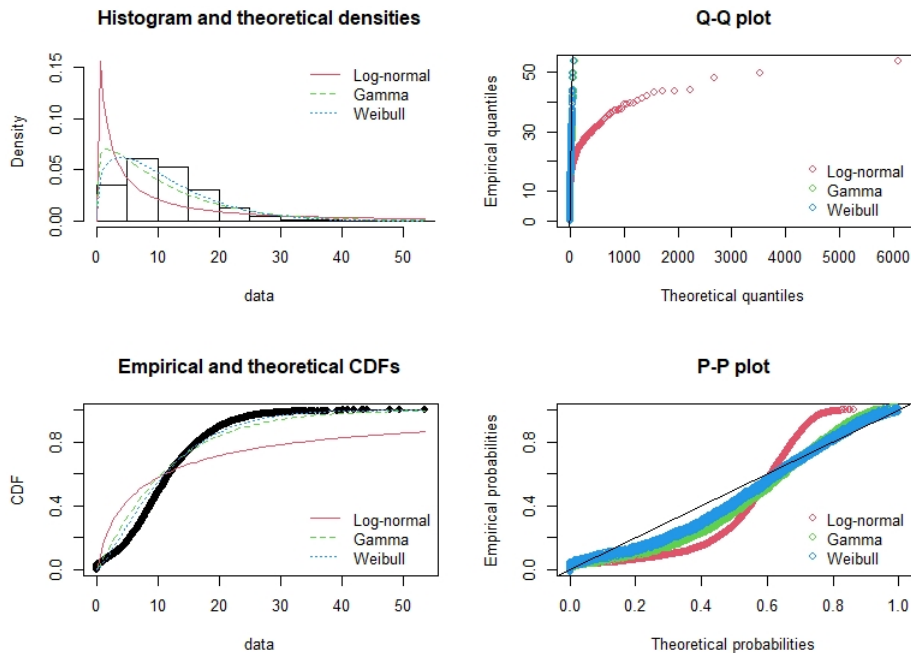


Fig. 3. Comparisons of the fits of the probability distributions applied to the growing stock in the coniferous forest

행되고 있으므로 도출된 Weibull 분포를 적용한 것을 타당한 것으로 판단된다(Son et al., 2012). 임상별로 추정된 Weibull 확률분포의 모수 추정치와 그 표준오차는 Table 5와 같다.

임상별, 그리고 전체 산림 탄소저장량의 95% 신뢰구간은 Table 6과 같으며, 시뮬레이션으로 도출된 각 항목의 탄소저장량 분포는 Fig. 5와 같다. 결과적으로 MCS를 이용하여 추정한 탄소저장량의 95% 신뢰구간과 Table 5의

입목축적 활동자료를 바탕으로 계산한 임상별 탄소저장량의 불확도는 침엽수림은 $\pm 9.8\%$, 활엽수림은 $\pm 7.4\%$ 로 평가되었으며 전체 산림을 대상으로 할 경우에는 불확도가 $\pm 6.0\%$ 로 임상별로 적용한 방법보다 표본개수의 증가로 인하여 낮게 평가되었다(Table 7). 스웨덴의 입목바이오매스 탄소저장량의 변화에 관한 불확도 평가와 관련된 연구에서 고정표본점 자료를 분석한 불확도가 $\pm 13\%$ 로 제시된 결과(Ståhl et al., 2004)와 비교할 때, 유사한 수준

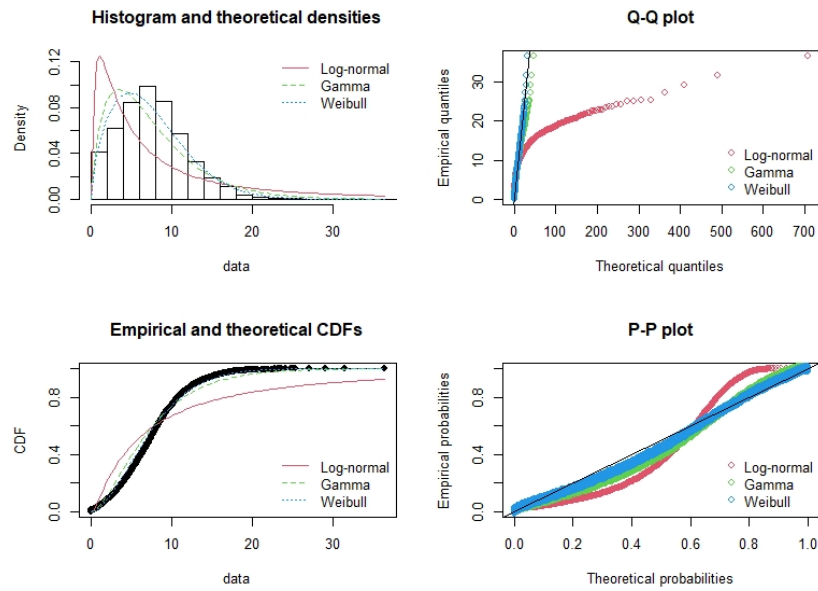


Fig. 4. Comparisons of the fits of the probability distributions applied to the growing stock in the deciduous forest

Table 5. Parameter estimate and its standard error of Weibull distribution for the growing stock by forest type

Forest type	Parameter	Estimate	Standard error
Coniferous forest	shape	1.31	0.0185
	scale	11.89	0.1579
Deciduous forest	shape	1.67	0.0181
	scale	8.37	0.0694

Table 6. 95% Confidence intervals of carbon stock in the coniferous, deciduous and whole forests

(unit: tC)

Classification	Coniferous forest	Deciduous forest	Whole forest
Lower bound	249,365,492	252,823,093	515,252,192
Upper bound	298,161,485	293,996,334	578,036,694
Conference interval	51,398,125	42,002,630	65,238,900

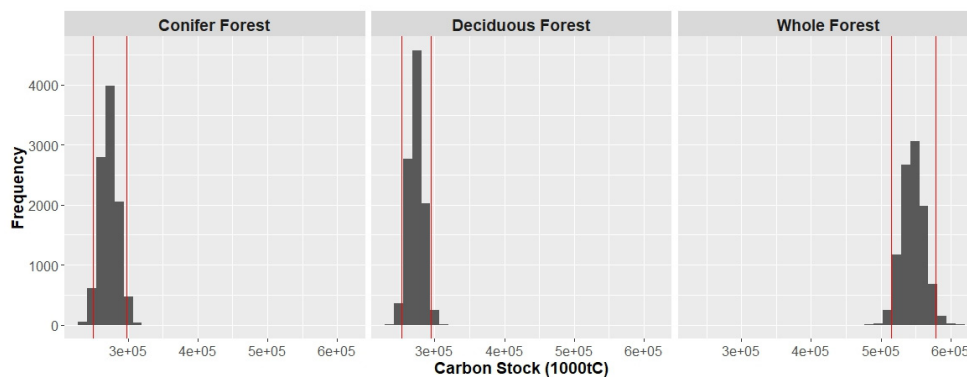


Fig. 5. Carbon stock distributions for coniferous, deciduous and whole forest generated by MCS (The red vertical lines indicate the upper and lower bounds of 95% confidence intervals)

의 불확도로 평가된다. 추후 탄소변화량의 불확도를 평가할 수 있는 방법을 개발할 필요가 있다.

Table 7. Uncertainty of carbon stock estimation by forest type from MCS

Forest type	Carbon stock (tC)	Uncertainty (%)
Coniferous	261,965,781	±9.8
Deciduous	285,363,622	±7.4
Whole	547,329,403	±6.0

3.2.3. 불확도 비교

본 연구는 입목바이오매스 탄소저장량의 불확도를 평가하기 위하여 오차증식법의 2가지 방법과 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 불확도를 비교하였다.

오차증식법을 적용한 경우, 탄소저장량에 미치는 설명변수의 불확도를 단순히 증식하는 방법의 불확도는 28%로 산출되었으며, 설명변수의 민감도를 가중치로 부여하는 증감법에 의한 불확도는 3.8%로 상대적으로 낮은 불확도를 나타내었다. 이는 입목바이오매스 탄소저장량 산출에 있어서 활동자료와 배출계수의 민감도를 적용하는 방법이 효과적인 방법으로 평가되었다. 한편, 임상별 임목축적의 확률밀도함수를 도출하고 이를 고려한 표본을 추출하여 신뢰구간을 추정하는 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 불확도는 6.0%로 오차증식법의 증감법에 의한 불확도보다 2.2% 높은 것으로 평가되었다. 입목바이오매스의 경우, 약 16,000개의 표본점에서 자료가 수집되어(KFRI, 2011) 추정치의 상대추정오차가 낮게 평가되어 증감법이 MCS 방법보다 불확도가 낮은 것으로 나타났다.

Holdaway et al.(2014)는 입목바이오매스의 불확도는 표본오차뿐만 아니라 개체목의 재적을 추정하기 위한 수종별 재적식 및 임목축적 추정을 위한 측정오차 등이 포함되어 있으므로 이러한 모델 및 측정오차에 관한 평가를 수행할 필요가 있다고 제시하였으며, Shin et al.(2022)도 개체목의 임목재적 추정을 위한 수간재적식과 수간재적 표에 따른 오차 발생가능성을 제기하였다. 따라서 입목바이오매스 탄소저장량에 미치는 민감도가 가장 높은 임상별 임목축적의 추정에 관한 개별 오차요인에 따른 불확도 평가를 통하여 이를 개선하기 위한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

토지이용, 토지이용변화 및 임업(LULUCF)분야의 탄소저장고는 자연에 의한 의존도가 높으며, 다양한 환경요인에 영향을 크게 받으므로 타 분야대비 상대적으로 불확도가 높으므로 장기간 모니터링에 의한 탄소수지 모델을 적용하는 방법을 적용하여 불확실성을 줄이기 위한 국가별 노력을 권고하고 있다. 파리체제는 국가별 온실가스 통계 및 격년투명성 보고서 등의 국제적 검토가 강화되고 있으므로 온실가스 통계에 관한 불확도 평가를 수행하고 불확도를 줄이기 위한 개선방안을 도출할 필요가 있다(UNFCCC, 2022).

본 연구는 우리나라 온실가스 인벤토리에서 가장 많은 온실가스 흡수량(removals)을 갖는 입목바이오매스 탄소저장량의 불확도를 평가하기 위하여 IPCC 지침에서 제시된 오차증식법(Tier 1)과 MCS방법(Tier 2)을 적용하여 불확도를 산정 및 비교하였다. 오차증식법의 경우, 단순증식법은 국가고유계수 불확도의 범위가 3~27%로 임목의 탄소저장량에 미치는 민감도를 고려하지 않을 경우 불확도는 ±28.0%로 높게 평가되었으며, 임목의 탄소저장량에 미치는 민감도를 고려한 증감법의 경우 상대적으로 불확도가 높지만 민감도가 낮은 부리함량비의 가중치가 낮게 부여됨에 따라 전체 불확도는 ±3.6%로 평가되었다. MCS방법의 경우, 임상별 임목축적은 Weibull의 분포형태로 나타내었고, 국가고유계수는 정규분포하는 가정을 적용하여 불확도를 평가한 결과 약 ±6.0%의 불확도를 나타내었다. 그러나, IPCC 지침에서 MCS 방법이 신뢰도가 높은 방법으로 제시되고 있으며, 국제적인 신뢰성 및 비교가능성을 고려할 때 MCS 방법에 의한 불확도를 적용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 “국립산림과학원 일반과제(2050 탄소중립사회 전환을 위한 산림기반 바이오경제 구축방안 연구, 과제번호: FM0200-2022-02-2022)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

Bechtold WA, and Patterson PL (Eds). 2005. The enhanced forest inventory and analysis program- National sampling

- design and estimation procedures. Gen. Tech. Rep. SRS-80. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. p.85.
- Cullen AC, Frey HC. 1999. Probabilistic Techniques in Exposure Assessment. 1st ed. New York: Plenum Publishing Corporation.
- Delignette-Muller ML, Dutang C. 2015. *fitdistrplus*: An R Package for Fitting Distributions. Journal of Statistical Software 64(4):1-34.
- GIR (Greenhouse Gas Information Research Center). 2021. 2021 National Greenhouse Gas Inventory report. (In Korean)
- Holdaway RJ, McNeill SJ, Mason NWH, Carswell FE. 2014. Propagating uncertainty in pot-based estimated of forest carbon stock and carbon stock change. Ecosystems. DOI: 10.1007/s10021-014-9749-5.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 1. General Guidance and Reporting. IPCC National Greenhouse Gas Inventory Programme. Institute for Global Environmental Strategies. pp.3.6-3.78.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2019. 2019 refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Chapter 3. Uncertainties in Volume 1. General Guidance and Reporting. IPCC National Greenhouse Gas Inventory Programme. Institute for Global Environmental Strategies. pp.3.1-3.48.
- KFRI (Korea Forest Research Institute). 2011. The 5th National forest Inventory Report. Seoul: National Institute of Forest Science. (in Korean)
- Lehtonen AR, Mäkipää J, Heikkinen RS, Liski J. 2004. Biomass Expansion factor (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. Forest Ecology and Management 188:211-224.
- McGlynn E, Li S, Berger MF, Amend M, Harper KL. 2022. Addressing uncertainty and bias in land use, land use change, and forestry greenhouse gas inventories. Climate change 170:5. DOI: 10.1007/s10584-021-03254-2
- Metsaranta JM, Shaw CH, Kurz WA, Boisvenue C, Morken S. 2017. Uncertainty of inventory-based estimates of the carbon dynamics of Canada's managed forest (1990-2014). Canadian Journal of Forest Research 47:1082-1094.
- Monni S, Peltoniemi M, Palosuo T, Lehtonen A, Mäkipää R, Savolainen I. 2007. Uncertainty of forest carbon stock changes-implications to the total uncertainty of GHG inventory of Finland. Climate Change 81:391-413.
- Monte L, Lars H, Ulla B, John B, Rudie H. 1996. Uncertainty analysis and validation of environmental models: The empirically based uncertainty analysis. Ecological Modelling 91:139-152.
- Pyo JK, Son YM, Jang GM, Lee YJ. 2013. Uncertainty assessment of emission factors for *Pinus densiflora* using Monte carlo simulation technique. Journal of Korean Forest Science 102(4):477-483. (In Korean with English abstract)
- R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Räty M, Kangas AS. 2019. Effect of permanent plots on the relative efficiency of spatially balanced sampling in a national forest inventory. Annals of Forest Science 76:20. DOI: 10.1007/s13595-019-0802-6
- Seo YO, Lee YJ, Pyo JK, Kim RH, Son YM, Lee KH. 2011. Bootstrap evaluation of stem density and biomass expansion factors in *Pinus rigida* stands in Korea. Journal of Korean Forest Science 100(4): 535-539. (In Korean with English abstract)
- Son YM, Lee KH, Chung YG. 1997. Stand growth estimation using non-linear growth equations. Journal of Korean Forest Science 86(2):135-145. (In Korean with English abstract)
- Son YM, Pyo JK, Kim SW, Lee KH. 2012. Prediction of stand volume and carbon stock for *Quercus variabilis* using weibull distribution model. Journal of Korean Forest Science 101(4):599-607. (In Korean with English abstract)
- Shin JH, Han H, Kim YH, Yim JS, Jang YS. 2022.

- Uncertainty in estimating forest growing stock from volume estimation of a standing tree by stem volume table and the resulting bias in carbon stock estimation: A case study in Hongcheon-Gun, Republic of Korea. *Journal of Climate Change Research* 13(3):355-364. (In Korean with English abstract)
- Ståhl G, Boström B, Lindkvist H, Lindroth A, Nilsson J, Olsson M. 2004. Methodological options for quantifying changes in carbon pools in Swedish forests. *Studia Forestalia suecica* 214:1-46.
- UNFCCC. 2016. FCCC/CP/2015/10/Add.1 (Decision 1/CP.21)
- UNFCCC. 2022. Reference manual for the enhanced transparency framework under the Paris Agreement - Understanding the enhanced transparency framework and its linkages. p.88.
- Wickham, H. 2016. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York.
- Yim JS, Juing IB, Kim JC, Kim SH, Ryu JH, Shin MY. 2012. Estimation of forest growing stock by combining annual forest inventory data. *Journal of Korean Forest Science* 101(2):213-219. (In Korean with English abstract)